Вестник Донского государственного технического университета. 2018. Т. 18, № 3. С. 326–332. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2018. Vol. 18, no. 3, pp. 326–332. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 519.711 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-3-326-332

Прогнозирование уровня подземных вод месторождения цементного сырья на основе динамических окрестностных моделей[*]

И. А. Седых[1**]
[1] Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Российская Федерация

Forecasting the groundwater level of cement raw materials deposit based on dynamic neighborhood models [***]

I. A. Sedykh[1**]
[1] Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

Введение. Статья посвящена разработке математической модели уровня подземных вод месторождения цементного сырья, расположенного в задонско-елецком водоносном горизонте, являющимся основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения города Липецка. Поэтому на стадии разработки месторождения необходимо проводить постоянный мониторинг и иметь возможность прогнозирования уровня подземных вод.
Цель работы — идентификация и исследование динамической окрестностной модели с переменными иерархическими окрестностями уровня подземных вод, позволяющей с достаточной точностью прогнозировать значение уровня вод в обследуемых скважинах.
Материалы и методы. Приведено определение динамической окрестностной модели с переменными иерархическими окрестностями, отличающейся изменяющимися во времени двухуровневыми окрестностными связями между узлами первого и второго уровня. В каждый следующий дискретный момент времени узлы окрестностной модели меняют свое состояние под воздействием текущих управлений и состояний узлов, входящих в их окрестности. В качестве частного случая рассмотрена модель с линейными функциями пересчета состояний. Параметрическая идентификация динамической окрестностной модели заключается в нахождении параметров системы для каждого узла второго уровня и основана на методе наименьших квадратов.
Результаты исследования. Разработана линейная динамическая окрестностная модель с переменными иерархическими окрестностями для прогнозирования уровня подземных вод месторождения цементного сырья, расположенного в задонско-елецком водоносном горизонте. Для параметрической идентификации и моделирования функционирования рассматриваемой динамической окрестностной модели разработано программное обеспечение на языке С++, позволяющее для заданной

Introduction. The development of a mathematical model for the groundwater level of a deposit of cement raw materials located in the Zadonian-Yelets aquifer, which is the principal domestic water supply source for the city of Lipetsk, is considered. Therefore, it is necessary to provide ongoing monitoring and to have the possibility to predict the water level under the field development. The work objectives are the identification and study of a dynamic neighborhood model with variable hierarchical neighborhoods of the groundwater level that enables to adequately predict value of the water level in the examined wells.
Materials and Methods. The definition of a dynamic neighborhood model with variable hierarchical neighborhoods is given, differing by time-varying double-level neighborhood communications between the first- and second-level nodes. At each next discrete instant of time, the neighborhood model nodes change their state under the influence of the online parameters and node states included in their neighborhood. As a subcase, we consider a model with line state recalculation functions. Parametric identification of the dynamic neighborhood model consists in finding the system parameters for each second-level node, and is based on the ordinary least squares.
Research Results. A linear dynamic neighborhood model with variable hierarchical neighborhoods for predicting the groundwater level in a cement raw material deposit located in the Zadonian-Yelets aquifer is developed. The software using C++ is developed for the parametric identification and simulation of the functioning of the dynamic neighborhood model under consideration. It enables to determine parameters



[*] Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №16-07-00-854).
[**] E-mail: sedykh-irina@yandex.ru
[***] The research is done with the financial support from RFFI (project no.16-07-00-854).

структуры находить параметры функций пересчета состояний узлов, а также прогнозировать поведение модели в процессе функционирования. Приведена иерархическая структура и проведена параметрическая идентификация линейной динамической окрестностной модели уровня подземных вод. После выполнения параметрической идентификации на обучающей выборке данных математическая модель проверена на контрольной выборке.
Обсуждение и заключения. Полученные средние относительные ошибки идентификации и прогноза свидетельствуют об адекватности разработанной модели и позволяют рекомендовать ее для прогнозирования уровня подземных вод месторождения цементного сырья.

of the node state recalculation functions for a given structure, and also to predict the model behavior in the operation process. A hierarchical structure is given, and a parametric identification of the linear dynamic neighborhood model of the groundwater level is carried out. After the parametric identification on the teaching data selection, the mathematical model is checked on the test sample.
Discussion and Conclusions. The obtained average ratio errors of the identification and forecast suggest the developed model validity and enable to recommend it for predicting the underground water level of a cement raw materials deposit.

Ключевые слова: уровень подземных вод, месторождение цементного сырья, динамическая окрестностная модель с переменными иерархическими окрестностями, параметрическая идентификация.

Keywords: groundwater level, deposit of cement raw materials, dynamic neighborhood model with variable hierarchical neighborhoods, parametric identification.

Образец для цитирования: Седых, И. А. Прогнозирование уровня подземных вод месторождения цементного сырья на основе динамических окрестностных моделей / И. А. Седых // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2018. — Т.18, №3. — С. 326−332. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-3-326-332

For citation: I. A. Sedykh Forecasting the groundwater level of cement raw materials deposit based on dynamic neighborhood models. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.3, pp. 326−332. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-3-326-332

Введение. Задонско-елецкий горизонт является основным продуктивным комплексом известняков, пригодным для цементной и металлургической промышленности [1]. Известняки светлого и светло-серого цвета, с желтоватым оттенком, средней крепости, трещиноватые, мелкозернистые. Часто встречаются крепкие известняки, представленные окремнёнными разностями. Известняки нередко пористые и кавернозные. Глинистые породы, пригодные для цементного производства, залегают среди четвертичных отложений, покрывающих известняки.

Вскрышные породы представлены плодородным слоем почвы, суглинками, некондиционной глиной, песком и слоем щебенки в верхней разрушенной части известняков.

Гидрогеологические условия месторождения простые. Сокольско-Ситовское месторождение приурочено в геоморфологическом отношении к присклоновой части долины реки Воронеж, чем обусловлена гидрогеологическая обстановка в районе месторождения [2].

Питание водоносного горизонта осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и за счет поглощения паводкового стока по долинам балок и оврагов. Разгрузка подземных вод происходит в реке Воронеж.

Современное положение уровня подземных вод изучено по режимным наблюдениям в 7 скважинах, равномерно расположенных на площади месторождения. Уровень подземных вод в меженный период меняется от 102,5 м до 109,7 м.

В настоящее время задонско-елецкий водоносный горизонт является основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения города Липецка. В связи с этим разработка известняков может производиться только в необводненной их части с оставлением предохранительного целика не менее 2,0 м, что рекомендовано санитарной службой Липецкой области.

Водоприток в разрабатываемый карьер месторождения возможен только за счет атмосферных осадков. В этой связи на стадии разработки месторождения необходимо проводить постоянный мониторинг состояния подземных вод задонско-елецкого водоносного горизонта и иметь возможность прогнозирования уровня подземных вод.

В работе для моделирования уровня подземных вод рассматриваемого месторождения применяются динамические окрестностные модели с переменными иерархическими окрестностями, позволяющие моделировать сложные пространственно-распределенные процессы и объекты, изменяющие свое состояние во времени [3–8].

Окрестностные модели впервые предложены в конце 90-х гг. XX века [9]. В [9–12] приведены основные определения и алгоритмы теории окрестностного моделирования. Понятия «окрестности»,

«окрестностные связи» рассматривается и в [13–14]. В них используются агенты, перемещающиеся по окрестностям и взаимодействующие друг с другом по определенным правилам. Сегодня теория окрестностного моделирования активно развивается. Появились динамические [6–8], недетерминированные модели [11], модели с переменными окрестностями [15].

Материалы и методы. В данной работе используются динамические окрестностные модели, применяющиеся для прогнозирования состояний пространственно распределенных систем. В них каждый узел которых является самостоятельным объектом, функционирующим во времени и связанным окрестностными связями с другими объектами системы. Это отличает рассматриваемые модели от широко применяющихся сегодня нейронных сетей, которые можно использовать для моделирования процесса функционирования каждого объекта или узла в отдельности. Методика окрестностного моделирования предназначена для одновременного совместного моделирования и прогнозирования поведения всех элементов распределенной системы.

Далее рассмотрим динамические окрестностные модели «вход-состояние» с переменными иерархическими окрестностями. Они отличаются изменяющимися во времени двухуровневыми окрестностными связями между узлами первого и второго уровня и линейными функциями пересчета состояний. Они позволяют, по сравнению с известными одноуровневыми окрестностными моделями, выполнять прогнозирование с более высокой точностью.

Динамическую окрестностную модель «вход-состояние» с переменными [15] иерархическими окрестностями можно задать набором $NS_{IER} = \left(N, X, V, G, X\left[0\right], t\right)$, где:

1) $N = \left(A, O_x, O_v, O_{ier}\right)$ — двухуровневая структура окрестностной модели; $A = \left\{a_1, a_2, ..., a_n\right\}$ — множество узлов первого уровня; O_x и O_v — окрестности связей узлов по состояниям и по управлениям соответственно; O_{ier} — иерархические окрестностные связи между узлами. Для каждого узла $a_i \in A$ определена своя окрестность по состояниям $O_x[a_i] \subseteq A$ и управлениям $O_v[a_i] \subseteq A$; $O_x = \bigcup_{i=1}^{n} O_x\left[a_i\right]$, $O_v = \bigcup_{i=1}^{n} O_v\left[a_i\right]$.

Некоторым узлам первого уровня $a_i \in A$ поставлено в соответствие множество узлов второго уровня $O_{ier}[a_i] = \{a_i^1, ..., a_i^c\}$. Все узлы $a_j \in O_x[a_i]$, $a_k \in O_v[a_i]$, оказывают влияние на узлы второго уровня $a_i^b \in O_{ier}[a_i]$.

В каждый момент времени определен только единственный активный узел $b = 1, ..., c$ такой, что $a_i^b \in O_{ier}[a_i, t]$.

Узел a_i^b является активным в момент времени t, если для него выполняется заданное условие активации $f_i^b[t] = \text{true}$. Для всех узлов второго уровня a_i^b $O_x[a_i^b] = O_x[a_i]$; $O_v[a_i^b] = O_v[a_i]$.

2) $X \in R^{\sum_{i=1}^{n} p_i}$ — блочный вектор состояний окрестностной модели в текущий момент времени, каждый блок которого $X[a_i] = X[i] \in R^{p_i}$ — вектор состояний в узле a_i системы, $i = 1, ..., n$.

3) $V \in R^{\sum_{i=1}^{n} m_i}$ — блочный вектор управлений в текущий момент времени, каждый блок которого $V[a_i] = V[i] \in R^{m_i}$ — вектор управлений в узле a_i системы, $i = 1, ..., n$.

4) $G: X_{O_x} \times V_{O_v} \to X$ — вектор-функция пересчета состояний окрестностной модели, где X_{O_x} — множество состояний узлов первого уровня, входящих в окрестность O_x; V_{O_v} — множество управлений узлов первого уровня, входящих в окрестность O_v.

Для узлов первого уровня $a_i \in A$ функция G_i будет иметь вид:

$$X[t+1, i] = G_i[t] = \sum_{b=1}^{c} X[t+1, i^b] = \sum_{b=1}^{c} G_i^b[t], \quad (1)$$

где $G_i^b : X_{O_x[a_i^b]} \times V_{O_v[a_i^b]} \to X[i^b]$ — функция пересчета состояний для узла второго уровня a_i^b.

Для каждого узла второго уровня $a_i^b \in O_{ier}[a_i, t]$ функция G_i^b в текущий момент времени в линейном случае имеет вид:

$$X[t+1,i^b] = \sum_{a_j \in O_x[a_{i^b}]} g_x^b[i^b, j]X[t, j] + \sum_{a_k \in O_v[a_{i^b}]} g_v^b[i^b,k]V[t,k] + g_c^b[i^b], \quad (2)$$

где $a_j, a_k \in A$ $\left(j,k = 1,...,n\right)$ — узлы первого уровня модели; $X[t,i^b] \in R^{p_i}$ — состояние в узле a_i^b в момент времени t; $V[t,i^b] \in R^{m_i}$ — управление в узле a_i^b в момент времени t; $g_x^b[i^b, j] \in R^{p_i \times p_j}$, $g_v^b[i^b,k] \in R^{p_i \times m_k}$, $g_c^b[i^b] \in R^{p_i \times 1}$ — матрицы-параметры модели.

Для каждого узла второго уровня $a_i^b \notin O_{ier}[a_i,t]$ функция G_i^b в текущий момент времени равна нулю, то есть $X[t+1,i^b] = G_i^b[t] = 0$.

5) $X[0] \in R^{\sum_{i=1}^{n} p_i}$ — начальное состояние модели.

6) t — текущий дискретный момент времени функционирования модели.

Структура окрестностной модели может быть представлена в виде одного двухуровневого графа структуры окрестностной модели — ориентированного графа с двумя видами дуг: по состояниям и управляющим воздействиям — или двух ориентированных графов — внешней и внутренней структур.

Параметрическая идентификация динамической окрестностной модели [16–17] заключается в нахождении параметров системы для каждого узла второго уровня и основана на методе наименьших квадратов:

$$E = \sum_{i=1}^{n} \left\| X[t+1,i] - G_i[t] \right\| \to \min.$$

Результаты исследования. Рассмотрим линейную динамическую окрестностную модель уровня подземных вод месторождения цементного сырья. Граф внешней структуры модели представлен на рис. 1. Узел a_1 — внешняя среда. В настоящее время для целей мониторинга уровня подземных вод используются 7 скважин, которые на рис. 1 соответствуют узлам $a_2 - a_8$. Управляющие воздействия узлов $V[t,i] \in R^{10}$ состоят из количества атмосферных осадков в мм и среднесуточной температуры воздуха в °C за последние 5 суток перед измерением уровня воды в скважинах в момент времени t, $i = 1,...,8$. Состояния узлов $X[t,i] \in R$ равны уровню воды в скважине i в момент времени t, $i = 2,...,8$.

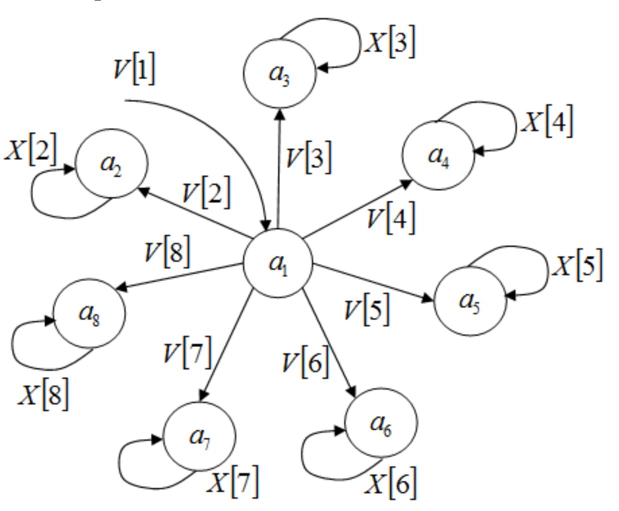


Рис. 1. Граф внешней структуры окрестностной модели

Узлы первого уровня окрестностной модели a_i ($i = 2,...,8$) являются иерархическими: $O_{ier}[a_i] = \{a_i^1, a_i^2\}$ и соответствуют положительной и отрицательной среднесуточной температуре воздуха. Их структура представлена на рис. 2.

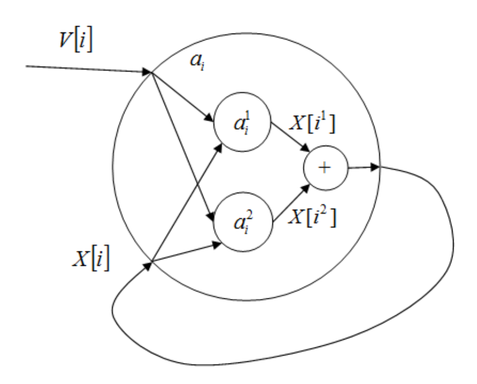


Рис. 2. Граф внутренней структуры узлов первого уровня

Система (2) для каждого узла второго уровня a_i^b окрестностной модели уровня подземных вод будет иметь вид:

$$X[t+1,i^b]=g_x^b[i,i^b]X[t,i^b]+g_v^b[i,i^b]V[t,i^b]+g_v^b[i^b], \quad (3)$$

где $g_x^b[i,i]\in R$; $g_v^b[i,i]\in R^{1\times 10}$; $g_c^b[i]\in R$; $i=2,...,8$; $b=1,2$.

Для параметрической идентификации и моделирования функционирования рассматриваемой динамической окрестностной модели разработана программа на языке С++. Начальными данными для идентификации являются структура и обучающая выборка. Программа позволяет находить параметры функций пересчета состояний узлов, а также прогнозировать поведение математической модели в процессе функционирования.

После проведения параметрической идентификации на обучающей выборке данных полученная модель была проверена на контрольной выборке. Нормированные исходные и модельные значения уровня подземных вод для узла a_2 для обучающей и контрольной выборок приведены соответственно на рис. 3 и рис. 4.

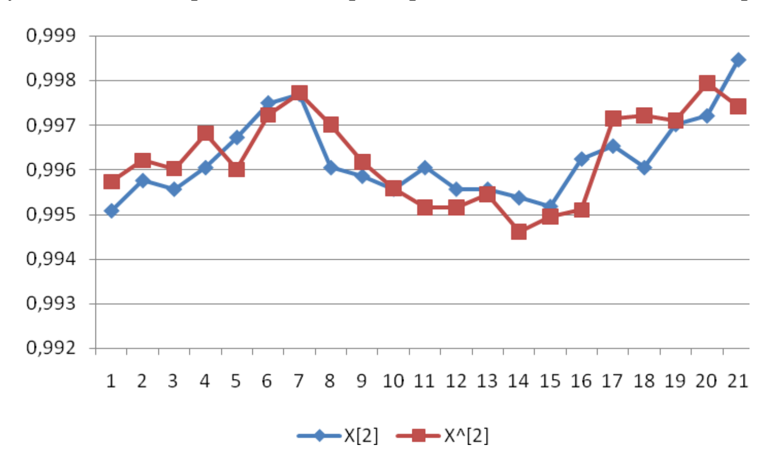


Рис. 3. Нормированные исходные и модельные значения уровня подземных вод для узла a_2

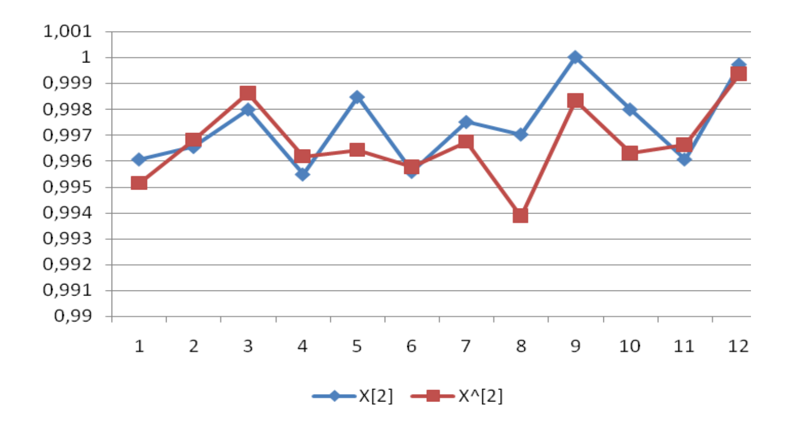


Рис. 4. Нормированные исходные и предсказанные значения уровня подземных вод для узла a_2

Средняя относительная ошибка идентификации (прогноза) окрестностной модели вычисляется по формуле:

$$A = \frac{1}{Mn}\sum_{k=1}^{M}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{\hat{X}_m[t+1,i]-X_m[t+1,i]}{X_m[t+1,i]}\right|\cdot 100\%,$$

где $X_m[t+1,i]$ — состояние узла a_i в m-ом кортеже обучающей (контрольной) выборки; $\hat{X}_m[t+1,i]$ — модельные значения состояния узла a_i; M — объем обучающей (контрольной) выборки.

Средняя относительная ошибка прогноза приведена на рис. 5.

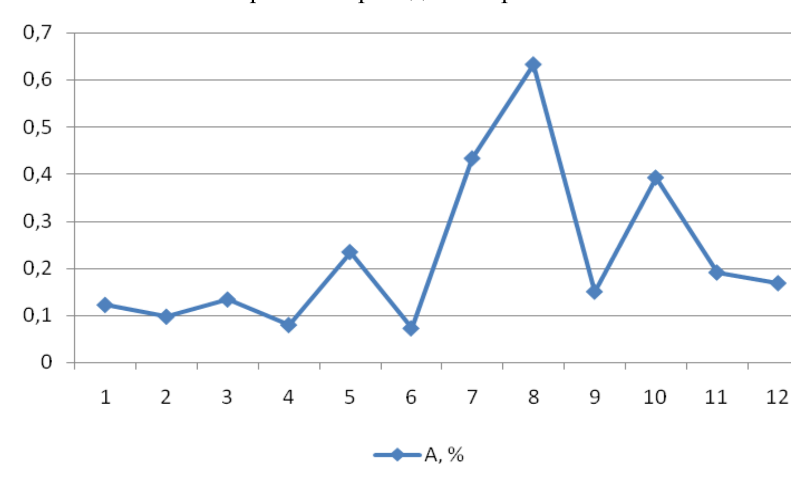


Рис. 5. Средняя относительная ошибка прогноза для каждого кортежа контрольной выборки

Средняя относительная ошибка идентификации составила 0,19%, средняя относительная ошибка прогноза — 0,23%, что свидетельствует об адекватности разработанной модели и позволяет рекомендовать ее для прогнозирования уровня подземных вод месторождения цементного сырья.

Обсуждение и заключения. Разработана линейная динамическая окрестностная модель с переменными иерархическими окрестностями для прогнозирования уровня подземных вод месторождения цементного сырья, расположенного в задонско-елецком водоносном горизонте.

Для параметрической идентификации и моделирования функционирования рассматриваемой динамической окрестностной модели разработано программное обеспечение на языке программирования С++.

Реализованная модель с достаточной точностью предсказывает уровень подземных вод в обследуемых скважинах и может быть эффективно использована для прогноза уровня подземных вод месторождения цементного сырья.

Библиографический список

1. Ткаченко, Н. Н. Евлановско-ливенский водоносный горизонт как альтернатива елецко-задонскому для водоснабжения г. Липецка / Н. Н. Ткаченко // Вестник ВГУ. Серия: Геология. — 2006. — № 2. — С. 255–257.

2. Косинова, И. И. Оценка степени преобразования отдельных элементов эколого-геологической системы в районе разработки Ситовского карьера Сокольско-Ситовского месторождения известняков / И. И. Косинова, М. Г. Заридзе // Вестник ВГУ. Серия: Геология. — 2010. — № 1. — С. 264–269.

3. Седых, И. А. Математическое моделирование максимальной концентрации выбросов при производстве клинкера / И. А. Седых, А. М. Шмырин. // В. И. Вернадский: устойчивое развитие регионов. Материалы Международной науч.-практ. конф. В 5 т. Т. 4. — Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2016. — С. 127–131.

4. Шмырин, А. М. Трилинейная окрестностная модель процесса формирования температуры смотки горячекатаной полосы / А. М. Шмырин, А. Г. Ярцев, В. В. Правильникова // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Серия: Естественные и технические науки. — 2016. — Т. 21, вып. 2. — С. 463–469. — DOI: https://doi.org/10.20310/1810-0198-2016-21-2-463-470.

5. Окрестностное моделирование процесса очистки сточных вод / А. М. Шмырин [и др.] // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2017. — Т. 22, вып. 3. — С. 596–604. — DOI: https://doi.org/10.20310/1810-0198-2017-22-3-596-604.

6. Седых, И. А. Проверка устойчивости линейных динамических окрестностных моделей процесса очистки сточных вод / И. А. Седых, А. М. Сметанникова // Материалы областного профильного семинара «Школа молодых ученых» по проблемам техн. наук 17.11.2017 г. — Липецк, 2017. — С. 125–129.

7. Седых, И. А. Окрестностное моделирование предела текучести стали после непрерывного отжига / И. А. Седых. — Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: мат-лы IV междунар. научно-практ. конф. (15–17 ноября 2017 г.). В 3 т. Т. 1— Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2017. — С. 378–383.

8. Седых, И. А. Критерий Гурвица для проверки устойчивости линейных динамических окрестностных моделей процесса очистки сточных вод / И. А. Седых, А. М. Сметанникова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. — 2018. — Т.7, №1(41). — С.67–71.

9. Блюмин, С. Л. Окрестностные системы / С. Л. Блюмин, А. М. Шмырин. — Липецк: ЛЭГИ, 2005. — 132 с.

10. Блюмин, С. Л. Билинейные окрестностные системы / С. Л. Блюмин, А. М. Шмырин, О. А. Шмырина. — Липецк: ЛЭГИ, 2006. — 131 с.

11. Окрестностное моделирование сетей Петри / С. Л. Блюмин [и др.] — Липецк: ЛЭГИ, 2010. — 124 с.

12. Шмырин, А. М. Общие билинейные дискретные модели / А. М. Шмырин, И. А. Седых, А. П. Щербаков // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2014. — Т.10, № 3–1. — С. 44–49.

13. Shang, Y. Multi-agent coordination in directed moving neighborhood random networks / Y. Shang // Chinese Physics B. — 2010. — Vol. 19. — No. 7. — Article ID 070201.

14. Shang, Y. Consensus in averager-copier-voter networks of moving dynamical agents / Y. Shang // Chaos. — 2017. — No 27 (2). — Article ID 023116.

15. Седых, И. А. Управление динамическими окрестностными моделями с переменными окрестностями / И. А. Седых // Системы управления и информационные технологии. — 2018. — №1(71). — С. 18–23.

16. Седых, И. А. Параметрическая идентификация линейной динамической окрестностной модели / И. А. Седых // Инновационная наука: прошлое, настоящее, будущее: сб. статей междунар. науч.-практ. конф. — Уфа, 2016. — С. 12–19.

17. Седых, И. А. Идентификация и управление динамическими окрестностными моделями / И. А. Седых // Современные сложные системы управления (HTCS'2017): мат-лы XII междунар. науч.-практ. конф. 25–27 октября 2017 г. В 2 ч. Ч. 1. — Липецк, 2017. — С. 138–142.

Поступила в редакцию 04.05.2018
Сдана в редакцию 05.05.2018
Запланирована в номер 05.07.2018

Received 04.05 .2018
Submitted 05.05.2018
Scheduled in the issue 05.07.2018

Об авторе:

Седых Ирина Александровна,
доцент кафедры «Высшая математика» Липецкого государственного технического университета (РФ, г. Липецк, ул. Московская, 30), кандидат физико-математических наук, доцент,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0012-8103
sedykh-irina@yandex.ru

Author:

Sedykh, Irina A.,
associate professor of the Higher Mathematics Department, Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya St., Lipetsk, RF), Cand.Sci. (Phys.-Math.), associate professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0012-8103
sedykh-irina@yandex.ru